

Б.Л. КАЩЕЕВ, д-р техн. наук, Б.Г. БОНДАРЬ, канд. техн. наук,  
И.Е. АНТИПОВ, канд. техн. наук

## К ВОПРОСУ О ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОЛИНИИ МЕТЕОРНОЙ СВЯЗИ

Радиометеорный канал связи (РМКС) возникает и исчезает случайно, что обусловлено случайностью самого физического явления «метеор». Из-за своего прерывистого характера РМКС применяется, как правило, для передачи цифровой информации, в виде пакетов определенного объема. Среди основных преимуществ РМКС можно указать следующие: большая (до 2500 км) дальность связи в диапазоне метровых волн при небольшой (десятки ватт) средней мощности передатчика; направленный характер распространения радиоволн и связанная с этим скрытость связи; отсутствие влияния солнечной активности и магнитных бурь на метеорное распространение [1]. Важнейшей характеристикой РМКС является коэффициент заполнения:

$$\eta = T_{\text{св}}/T_{\Sigma}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{св}}$  — время существования канала;  $T_{\Sigma}$  — полное время работы системы. При определенной рабочей частоте и энергетических параметрах аппаратуры он зависит от длины, расположения и ориентации трассы, подвержен суточным и сезонным изменениям.

Прогресс в развитии микроэлектроники решил проблему управления процедурой обмена данными по РМКС и предоставил возможность создания сравнительно недорогой аппаратуры метеорной связи, которая может быть использована и в условиях Украины, особенно в гористой местности западных областей и Крыма. Цель настоящей работы — дать оценку пропускной способности несложной аппаратуры метеорной связи с устройством управления на базе однокристалльной ЭВМ.

Прерывистый характер связи вынуждает идти на дополнительные затраты времени для обнаружения канала, передачи служебных сигналов для поиска канала, синхронизации и подтверждения неискаженного приема. Важное значение имеют меры, обеспечивающие заданную достоверность передачи информации и исправление возникающих ошибок. Их реализация также требует затрат времени. Кроме того, следует учитывать время распространения информационных и служебных сигналов на трассе. Для учета этих потерь нами вводится понятие коэффициента использования РМКС, представляющего собой отноше-

ние времени  $T_{\text{инф}}$  передачи по каналу полезной информации ко времени существования этого канала:

$$\xi = T_{\text{инф}} / T_{\text{св}}. \quad (2)$$

Рассмотрим простейший алгоритм передачи информации по РМКС, использованный в аппаратуре, которая разработана и создана в Проблемной научно-исследовательской лаборатории радиотехники Харьковского государственного технического университета радиоэлектроники. Одна из станций (ведущая) непрерывно передает зондирующий сигнал для обнаружения канала. В случае приема зондирующего сигнала, свидетельствующего о возникновении канала, станция-корреспондент передает информационный пакет определенного объема. Его неискаженный прием подтверждается квитанцией, которая одновременно служит сигналом для передачи следующего пакета. При обнаружении ошибки запрашивается повтор целого пакета. Мгновенная мощность передатчика составляет 500 Вт в полосе частот 15 кГц. Более подробно алгоритм и аппаратура описаны в [2]. Объем пакета, близкий к оптимальному (без учета вероятности искажений), определяется его длительностью и вероятностным распределением времени существования метеорных сигналов, которое описывается экспоненциальным законом. Если исходить из среднего значения длительности метеорного следа 500 мс [1] и скорости передачи 4800 бит/с, то близким к оптимальному можно считать объем пакета 500...1000 бит. Как показывает практика, указанная скорость передачи наилучшим образом соответствует возможностям аппаратуры с приведенными параметрами. Ее повышение связано с необходимостью расширения полосы пропускания и, следовательно, с увеличением мощности передатчика, усложнением его конструкции и устройства питания. Снижение скорости передачи и соответствующее уменьшение полосы пропускания приемника и мощности передатчика затруднены в связи с необходимостью обеспечить стабильность частот задающего генератора передатчика и гетеродина приемника (не хуже  $10^{-6}$ ), что также усложняет конструкцию аппаратуры.

Без учета вероятности искажения пакета выражение для коэффициента использования имеет вид

$$\xi = \frac{N t_{\text{пак}}}{\frac{T_{\text{зонд}}}{2} + t_{\text{зонд}} + t_{\text{расп}} + t_{\text{синх}} + (N + 0,5)(2t_{\text{расп}} + t_{\text{квит}} + t_{\text{пак}})}, \quad (3)$$

где  $N$  — число пакетов, переданных через один метеорный след;  $t_{\text{пак}}$  — длительность пакета;  $T_{\text{зонд}}$  — период повторения зондирующего сигнала;  $t_{\text{зонд}}$  — длительность зондирующего сигнала;  $t_{\text{расп}}$  — время распространения сигнала на трассе связи;  $t_{\text{синхр}}$  — длительность синхросигнала;  $t_{\text{квит}}$  — длительность сигнала подтверждения (квитанции).

Потеря времени связи, обусловленная незавершенностью передачи последнего пакета при окончании следа, статистически равна половине длительности пакета. При объеме пакета 500 бит и  $N = 10$  коэффициент  $\xi \approx 0,82$ .

Однако использование пакета упомянутого выше объема при исправлении ошибок путем повторения целого пакета, содержащего ошибку, недопустимо, поскольку при вероятности битовой ошибки  $p_{\text{бит}} = 10^{-3}$  вероятность безошибочного приема целого пакета длиной в 1000 бит составляет всего 37 % и на повторение ошибочных пакетов будет уходить большая часть времени связи. Если исходить из допустимой вероятности появления ошибки в пакете  $10^{-1}$ , то при той же вероятности битовой ошибки оптимальным следует считать объем пакета 100...120 бит. Тогда с учетом потерь времени на повторение искаженных пакетов выражение (3) можно записать в виде

$$\xi = \frac{Nl_{\text{пак}}(1 + p_{\text{пак}})}{\frac{T_{\text{зонд}}}{2} + t_{\text{зонд}} + t_{\text{расп}} + t_{\text{синх}} + (N + 0,5)(2t_{\text{расп}} + t_{\text{квит}} + t_{\text{пак}})}, \quad (4)$$

где  $p_{\text{пак}}$  — вероятность искажения пакета. В данном случае при  $p_{\text{бит}} = 10^{-3}$ ,  $n_{\text{пак}} = 100$  бит и  $N = 10$  коэффициент  $\xi = 0,64$ .

При рассмотрении этого достаточно простого алгоритма передачи данных необходимо остановиться на выявлении ошибок, неизбежно возникающих в РМКС. Характерной особенностью канала является флуктуация амплитуды отраженного сигнала при общей тенденции его экспоненциального снижения [1], поэтому очевидно, что значительная часть ошибок связана именно с “провалами” уровня сигнала. Один из способов предотвращения таких ошибок, не требующий дополнительных затрат времени связи, — контроль уровня принимаемого сигнала. Другой способ — контроль общего объема пакета, который при наличии помех или “провалов” может отличаться от установленного. В связи с этим следует отметить особую важность контроля уровня принимаемого сигнала в приемном тракте и ограничения обмена данными при снижении отношения сигнал-шум ниже допустимого. Для примененного в аппаратуре способа модуляции и детектирования сигнала вероятность битовой ошибки не выше  $10^{-3}$  обеспечивается при отношении сигнал-шум на входе приемника не менее 15 дБ.

Коэффициенту заполнения  $10^{-2}$  и коэффициенту использования 0,64 соответствует пропускная способность РМКС 30 бит/с. На коротких трассах (менее 200 км) коэффициент заполнения может оказаться меньше 1 %, однако проведенные эксперименты показывают, что устойчивая связь обеспечивается и в этом случае. В летние утренние часы, когда коэффициент заполнения может превышать 5...6 %, пропускная способность РМКС при  $\xi = 0,64$  составит 150...180 бит/с. Такие данные соответствуют полученным в мировой практике [1].

Как известно, предельно достижимая пропускная способность канала определяется формулой Шеннона. Для приведенных энергетических параметров аппаратуры, работающей при отношении сигнал-шум на выходе приемника 15 дБ, и коэффициента заполнения 1 % предел составляет примерно 300 бит/с, что заметно превосходит приведенное выше значение. Главная причина столь значительного различия реальной и теоретически достижимой пропускной способности заключается в том, что время изменения параметров РМКС и само время его существования соизмеримо с временем распространения сигнала по трассе. Это обстоятельство сводит к минимуму или полностью исключает возможность адаптивной подстройки системы к изменениям. Поэтому сколько-нибудь заметное приближение пропускной способности РМКС к пределу Шеннона вряд ли возможно.

Если ограничиться только указанными мерами обнаружения ошибок, то, как показывают экспериментальные исследования [2], вероятность появления необнаруженной ошибки составляет примерно  $2 \cdot 10^{-3}$ , т.е. одна ошибка приходится на 100 букв, что считается допустимым, например, в телеграфной связи. Применение помехоустойчивого кодирования повысит достоверность передачи, однако снизит коэффициент использования времени существования следа и, следовательно, пропускную способность канала.

Необходимо также указать, что в ряде случаев наиболее существенным параметром надо считать не пропускную способность, а время ожидания возникновения полезного метеорного следа. Это время, как и длительность следа, является случайной величиной, функция распределения которой приближенно описывается экспоненциальной зависимостью. В самых неблагоприятных условиях среднее время ожидания не превосходит несколько минут, а с вероятностью 95 % не превышает 10...15 мин (данные для длинных трасс [1]).

В заключение следует отметить, что недорогая, несложная и экономичная в эксплуатации аппаратура метеорной связи может найти применение, в частности, в сети для сбора метеорологической или иной информации от сотен пунктов в обширном районе, а также для связи с подвижными объектами, о чем свидетельствует мировой опыт [3].

**Список литературы:** 1. *Кащеев Б.Л., Бондарь Б.Г., Горбач В.И.* Метеоры сегодня. К.: Техника, 1996. 196 с. 2. *Антипов И.Е.* Оптимизация ориентации диаграмм направленности антенн метеорных радиотехнических систем с целью повышения их пропускной способности в условиях коротких трасс: Дис... канд. техн. наук. Х., 1996. 148 с. Машинопись. 3. *Кащеев Б.Л., Бондарь Б.Г.* Метеорная связь: Учеб. пособие. К.: Учеб.-метод. каб. высш. образования, 1989. 76 с.

*Харьковский государственный технический университет радиотехники*

*Поступила в редколлегию 14.07.98*